

Försurningsläget i Sveriges ytvatten 2010

komplettering till rapport 2011:24

—
Underlag till utvärdering av miljömålet ”Bara naturlig försurning”



Försurningsläget i Sveriges ytvatten 2010

komplettering till rapport 2011:24

—

Underlag till utvärdering av miljömålet "Bara naturlig försurning"

Jens Fölster och Salar Valinia

Institutionen för vatten och miljö, SLU

Box 7050

750 07 Uppsala

Tel. 018 – 67 31 10

<http://www.slu.se/vatten-miljo>

Omslagsfoto: Provtagning med helikopter. Foto: Jens Fölster

Tryck: Institutionen för vatten och miljö, SLU
Uppsala, 2012-05-18

Förord

Denna rapport utgör en redovisning av ett uppdrag åt Naturvårdsverket att uppdatera underlaget till den fördjupade utvärderingen av miljömålet ”Bara naturlig försurning” utifrån en reviderad version av verktyget för försurningsbedömning, MAGIC^{bibliotek, 2012}. Salar Valinia har varit ansvarig för jämförelsen mellan paleolimnologi och MAGIC-modellering, medan Jens Fölster har stått för resten av materialet.

Rapporten har interngranskats av Anders Düker på Institutionen för vatten och miljö, SLU.

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	5
Sammanfattning.....	6
Inledning	7
Dataunderlag och metoder	8
Trender i vattenkemin	8
Trender i oorganiskt aluminium.....	10
Försurningsbedömning med MAGICbibliotek,2012	12
Matchningsresultat	12
Andel kalkade och försurade sjöar i Sverige	12
Regional fördelning.....	12
Osäkerheten som beror av det slumpmässiga urvalet	17
Förändring i andelen försurade sjöar med tiden.....	17
Uppskattning av försurningspåverkan i vattendrag	18
Skillnad i bedömningen av försurningspåverkan jämfört med bedömningen till den fördjupade utvärderingen 2007.....	19
Jämförelse av referens-pH från paleolimnologi och MAGIC.....	20
Kritisk belastning.....	23
Referenser	25

Sammanfattning

Till den fördjupade utvärderingen av miljömålet ”Bara naturlig försurning” levererades underlag med trender i vattenkemi, samt bedömning av försurningspåverkan och överskridande av kritisk belastning i rapporten ”Försurningsläget i Sveriges ytvatten 2010 (Fölster och Köhler, 2011). I rapporten framkom tveksamheter i beräkningsunderlaget vilket föranledde en revidering av de modelleringar som ligger till grund för verktyget ”MAGIC_{bibliotek}” som används för bedömningarna. Denna rapport omfattar en revidering av bedömningarna av försurningspåverkan och kritisk belastning utifrån det nya reviderade verktyget. Det innehåller även en komplettering av trendanalyserna med trender för oorganiskt aluminium.

Trendanalysen visade generellt på minskande trender av sulfat och baskatjoner samt ökande trender av ANC, TOC och pH i både sjöar och vattendrag. Halterna oorganiskt aluminium visade tendenser till minskning i försurningskänsliga sjöar och små skogsbackar.

Andelen försurade sjöar i Sverige uppskattades utifrån Omdrevsinventeringen av sjöar 2007-2009 med den nya versionen av MAGIC_{bibliotek} (mb2012). Enligt det nya underlaget var 10 % av Sveriges sjöar > 1 ha försurade inklusive kalkade försurade sjöar. Det tidigare delmålet för försurade sjöar omfattade bara sjöar > 4 ha och kalkade sjöar betraktades inte som försurade. Med den avgränsningen var 4,2 % försurade vilket innebär att delmålet att < 5 % av Sveriges sjöar tillåts vara försurade är uppfyllt. Med den tidigare versionen av bedömningsverktyget, mb2010 var 12 % av Sveriges sjöar > 1 ha försurade inklusive försurade kalkade sjöar. Skillnaden mellan mb2010 och mb2012 gäller främst de okalkade sjöarna. För de kalkade sjöarna var andelen försurade sjöar ca 60 % oavsett biblioteksversion.

I norra Sverige är 2,6 % av sjöarna försurade, i östra och mellersta Sverige 7,9 %, medan hela 45,9 % av sjöarna i sydvästra Sverige är försurade. Den nya versionen av MAGIC_{bibliotek}, mb2012, ger en något tydligare uppdelning i regioner jämfört med mb2010 med stor andel försurade sjöar i sydvästra Sverige.

I sydvästra Sverige påbörjades försurningen redan för hundra år sedan. I övriga Sverige var det först efter 1950 som sjöförsurningen tog fart. På 1980-talet nådde försurningen sitt maximum med 56 % av sjöarna försurade i sydvästra Sverige, 16 % i östra och mellersta Sverige samt 9 % i norra Sverige. Återhämtningen var snabbast under 1990-talet och i dag är försurningen nere i 46 %, 7,9 % respektive 2,6 % i de tre respektive landsdelarna. Återhämtningen är betydligt måttligare jämfört med den enligt beräkningarna med versionen av MAGIC_{bibliotek} från 2007, som låg till grund för den Fördjupade utvärderingen 2007.

Den uppdaterade versionen av MAGIC_{bibliotek}, mb2012, ger en bra överensstämmelse med de paleolimnologiska rekonstruktionerna av pH och de flesta undersökta sjöarna faller inom felintervallet på $\pm 0,3$ pH-enheter för den paleolimnologiska metoden. Fortfarande visar dock MAGIC-modelleringarna högre referens-pH i jämförelse med paleolimnologi, men skillnaden är betydligt mindre än tidigare, bara 0,1 enheter. Om man antar att MAGIC_{bibliotek} därmed överskattar försurningen med 0,1 enheter och korregerar för detta är andelen försurade sjöar i Sverige 8 %.

Den kritiska belastningen överskreds på 22 % av Sveriges areal år 2010 enligt det nya dataunderlaget. Detta är betydligt högre än beräkningarna i Rapport 2011:24. Överskridandet var högst i sydvästra Sverige. Fram till år 2020 beräknas den överskridna arealen ha minskat till 19 % om man genomför beslutade åtgärder (CLE-scenariet).

Inledning

Inför den fördjupade utvärderingen av miljömålet ”Bara naturlig försurning” som ska slutföras 2012 tog SLU fram ett underlag som beskriver utveckling och tillstånd av surhet och försurning (Fölster och Köhler, 2011). Utvärderingen omfattade bland annat försurningsbedömningar med verktyget MAGIC_{bibliotek} (www.ivl.se/magicbibliotek) som tagits fram av IVL. Den version av verktyget som användes hade tagits fram i samband med utvärderingen av Målsjöinventeringen (Fölster m. fl., 2011). Jämfört med den tidigare versionen som användes till den fördjupade utvärderingen 2007, mb2007, hade modelleringarna med MAGIC gjorts om med nya depositionsdata och ett stort antal okalkade referenser inom Målsjöinventeringen lagts till. Då det visade sig att de nya beräkningarna gav mer än dubbelt så många försurade sjöar i Sverige jämfört med beräkningen till den förra fördjupade utvärderingen gavs SLU i uppdrag att göra en fördjupad granskning av beräkningsunderlaget som redovisas i två rapporter (Fölster och Köhler, 2011; Köhler och Fölster, 2011). Granskningen visade att ungefär hälften av skillnaden berodde på förbättrat dataunderlag och den andra hälften på att MAGIC_{bibliotek} från 2010 (mb2010) i genomsnitt gav högre andel försurade sjöar jämfört med mb2010. I rapporterna kunde vi visa på att mb2010 överskattade försurningen, bland annat genom en jämförelse med paleolimnologisk rekonstruktion av förindustriellt pH. Detta ledde fram till att modelleringarna med MAGIC gjordes om, bland annat med ännu nyare depositionsdata från EMEP. I denna rapport redovisas resultaten av tillämpningar av en ny version av MAGIC_{bibliotek}, mb2012. Nya beräkningar av kritisk belastning har också gjorts baserat på mb2012 och med de nya depositionsdata från EMEP. Rapporten ska ses som ett komplement till den förra rapporten och för mycket av detaljerna i beskrivning av material och metod hänvisas till denna rapport. Genomgående görs jämförelser mellan mb2010 och mb2012 för att belysa bedömningen av försurningsläget ändrats med det nya biblioteket. En kompletterande redovisning av trender av halter i sjöar och vattendrag ingår också i rapporten.

Dataunderlag och metoder

Dataunderlaget omfattar tidsserier från de nationella och regionala miljöövervakningsprogrammen i sjöar och vattendrag samt slumpvis utvalda sjöar från det nationella miljöövervakningsprogrammet Omdrevssjöar. För mer detaljerad information hänvisas till Fölster och Köhler, (2011). Där redovisas även metoder för trendanalyser och försurningsbedömning av kalkade och okalkade sjöar samt beräkning av kritisk belastning.

Försurningsbedömningarna är gjorda med MAGIC_{bibliotek}, ett verktyg som tagits fram av IVL (<http://www.ivl.se/magicbibliotek>). Den version som används är från 2012 och benämns mb2012. Tidigare versioner benämns på motsvarande sätt med mb2010 och mb2007.

Depositionen som användes för beräkning av kritisk belastning hämtades från EMEP <http://www.emep.int/> (2012).

Kompletteringen av trendanalyserna med trender i oorganiskt aluminium (Ali) bygger på modellerade värden (Köhler, 2011). Den modell som använts är en empirisk modell med Ali som en funktion av pH, fluorid (F) och kvoten mellan totalaluminium (Al) och totalkol (TOC) enligt formeln:

$$\text{Ali} = \text{Exp}(4.04 - 0.88 \text{ pH} + 0.0042 \text{ F} + 0.100 \cdot \text{Al}/\text{TOC} - 0.0045 \cdot (\text{Al}/\text{TOC} - 9.8)^2 \text{ (ekv 1)})$$

där Exp står för $e^{(x)}$, F är i $\mu\text{g/l}$, Al och Ali i $\mu\text{mol/l}$ och TOC i mmol/l . Ali räknas sedan om till $\mu\text{g/l}$ genom att multiplicera med molvikten (27 g/mol).

Trender i vattenkemin

I tabell 1 sammanfattas de trendanalyser som presenteras utförligare i Fölster och Köhler (2011). Resultaten visar generellt på minskande trender av sulfat och baskatjoner samt ökande trender av ANC, TOC och pH i både sjöar och vattendrag.

Tabell 1. Trender i vattenkemi i jonsvaga sjöar och vattendrag opåverkade av punktutsläpp. Signifikanta trender (Sign.) avser trender med ett p-värde $\leq 0,05$ enligt test med Seasonal-Kendall. Rosa färg anger att trenden går mot surare tillstånd och blått att trenden går mot mindre surt tillstånd

		Sjöar				Vattendrag			
Sulfat		Minskande trend		Ökande trend		Minskande trend		Ökande trend	
		Sign	Osign	Osign	Sign	Sign	Osign	Osign	Sign
1990-1999	Norr	25	1	0	1	11	7	4	0
	Söder	41	0	0	0	14	3	1	0
2000-2010	Norr	19	5	2	1	11	7	3	1
	Söder	33	5	2	1	14	4	0	0

BC		Minskande trend		Ökande trend		Minskande trend		Ökande trend	
		Sign	Osign	Osign	Sign	Sign	Osign	Osign	Sign
1990-1999	Norr	6	4	13	4	1	8	12	1
	Söder	39	1	1	0	5	6	5	2
2000-2010	Norr	2	10	14	1	0	7	13	2
	Söder	22	17	2	0	5	9	4	0

ANC		Minskande trend		Ökande trend		Minskande trend		Ökande trend	
		Sign	Osign	Osign	Sign	Sign	Osign	Osign	Sign
1990-1999	Norr	0	0	0	27	0	5	13	4
	Söder	0	2	4	35	1	3	6	8
2000-2010	Norr	0	6	17	4	0	4	13	5
	Söder	2	16	23	0	0	6	10	2

TOC		Minskande trend		Ökande trend		Minskande trend		Ökande trend	
		Sign	Osign	Osign	Sign	Sign	Osign	Osign	Sign
1990-1999	Norr	0	1	12	14	1	0	11	10
	Söder	0	1	6	34	0	0	8	10
2000-2010	Norr	0	0	24	3	0	1	15	6
	Söder	0	2	17	22	0	0	8	10

pH		Minskande trend		Ökande trend		Minskande trend		Ökande trend	
		Sign	Osign	Osign	Sign	Sign	Osign	Osign	Sign
1990-1999	Norr	0	2	9	16	0	0	8	14
	Söder	0	5	13	23	0	2	5	11
2000-2010	Norr	0	2	23	2	0	0	20	2
	Söder	1	9	22	9	0	3	13	2

Trender i oorganiskt aluminium

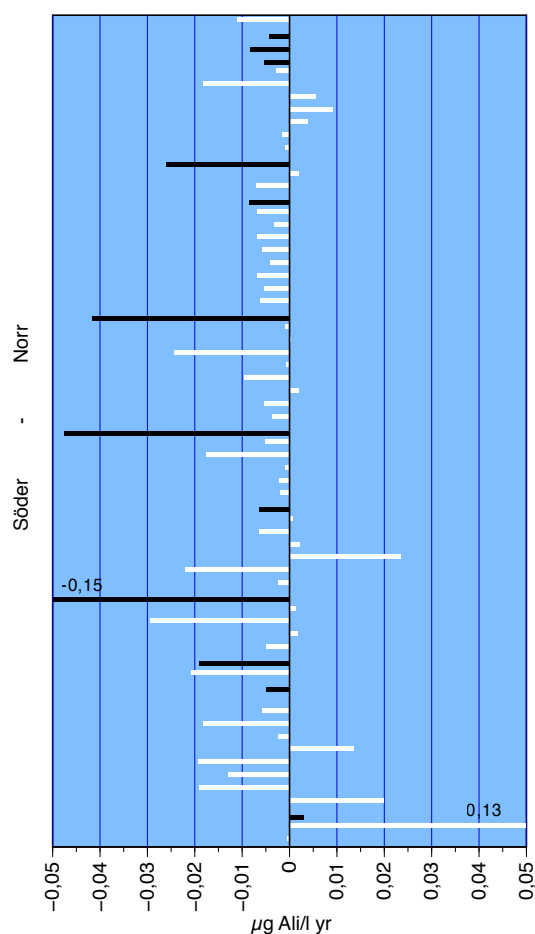
Skador på gälarna av organiskt aluminium (Ali) anses vara den mekanism som främst ger skador på fisk vid förorening. Mätvärden på Ali finns inte tillgängliga i någon större omfattning i representativa sjöar och vattendrag, men det har visat sig gå att beräkna halten ur andra mätdata. Den modell som används här är en empirisk modell (ekv. 1) som visat sig ge mindre prediktionsfel jämfört med en kemisk jämviktsmodell (Köhler, 2011). Analysen begränsades av tillgången till data på totalaluminium till perioden 1998 – 2010.

Sjöar

De flesta sjöarna, 38 av 65, hade Ali medianhalter < 20 µg/l som föreslagits som ett nedre gränsvärde för skador på gälar (Fölster, 2007). Av de resterande 27 sjöarna hade 5 sjöar mellan 50 och 100 µg Ali /l (tabell 2). Trendanalyserna visar på svaga men dominerande minskande trender (figur 1). I 11 av 12 sjöar med signifikanta trender av Ali minskade halten. Det fanns inget tydligt regionalt mönster i trenderna.

Tabell 2. Medianhalter av modellerat oorganiskt aluminium (Ali) i sjöar 1998 – 2010.

Ali µg/l (median)	Antal sjöar
< 20	38
20 - 50	22
50 - 100	5
100 - 200	0



Figur 1. Trender i beräknad halt Ali i sjöar 1998-2010.

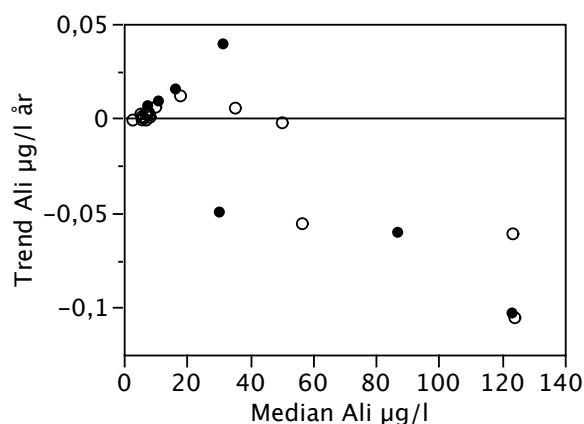
Vattendrag

Även i vattendragen var halterna Ali oftast låga. I 18 av 27 vattendrag var medianhalten < 20 $\mu\text{g/l}$. Samtidigt förekom högre halter än i sjöarna, med halter mellan 100 och 200 i tre av vattendragen (tabell 3). Trenderna i vattendragen är inte lika entydiga som för sjöarna.

Ökande och minskande trender förekommer i samma utsträckning både vad gäller signifikanta och icke signifikanta trender, men om man tittar närmare på trenderna ser man att alla med en förändring på $0,05$ $\mu\text{g/l}$ år eller mer förekommer i vattendrag med medianhalter av Ali > 30 $\mu\text{g/l}$ (figur 2). De sex bäckarna med höga halter och relativt starkt minskande trender av Ali är samtliga små skogsbäckar inom det tidigare PMK-programmet som valdes ut för att bl. a. representera försurningskänsliga områden (Naturvårdsverket, 1985). De övriga vattendragen utgörs av i många fall av större älvar. Det går alltså att säga att halten Ali minskat i små försurningskänsliga bäckar med höga halter Ali. Ett undantag utgör Höjdabäcken i PMK-området Stenbitshöjden som har en svagt positiv, men signifikant ökande trend och en medianhalt på 32 $\mu\text{g/l}$.

Tabell 3. Medianhalter av modellerat oorganiskt aluminium (Ali) i vattendrag 1996 – 2010.

Ali $\mu\text{g/l}$ (median)	Antal vattendrag
< 20	18
20 - 50	3
50 - 100	3
100 - 200	3



Figur 2. Trend i modellerad halt oorganiskt aluminium (Ali) mot medianhalten i försurningskänsliga vattendrag. Fylld symbol avser statistiskt signifikant förändring.

Försurningsbedömning med MAGIC_{bibliotek,2012}

Matchningsresultat

Med MAGIC_{bibliotek,2012} (mb2012) passerade en något mindre andel Filter 1 jämfört med mb2010 (tabell 4). Det avspeglar delvis att filtergränserna satts strängare som en anpassning till att biblioteket byggts ut med fler sjöar så att kraven på matchning kunnat höjas (pers. kom. Filip Moldan). De 119 omatchade sjöarna utgjordes till största delen av naturligt kalkrika slättlandssjöar som inte kan betraktas som försurade. Bara 11 av de 119 sjöarna hade pH < 6,6 och 6 sjöar en alkalinitet < 0,3 mekv/l. Bara en omatchad sjö hade pH < 6, Trusksjön i Uppland med en halt TOC på 74 mg/l och en SO₄-halt på 0,014 mekv/l. Den omatchade sjön Bredviken i Västerbotten med ett pH-värde på 6,5 låg under högsta kustlinjen och hade en SO₄-halt på 0,3 mekv/l, vilket är 10 ggr medianhalten för länet. Den bedömdes därför vara påverkad av sulfidjordar i avrinningsområdet och inte antropogent försurad. Sammantaget gjordes bedömningen att de omatchade sjöarna kunde betraktas som icke försurade.

Tabell 4. Matchningssäkerhet. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Matchning	Antal sjöar	
	mb2010	mb2012
Filter1	1643	1417
Filter2	600	710
Filter3	63	164
Omatchad	104	119

Andel kalkade och försurade sjöar i Sverige

Det gamla delmålet för försurning gällde andelen av sjöar > 4 ha som är försurade men ej kalkade. Med mb2012 är målet på < 5 % försurade sjöar uppfyllt (tabell 5). Om man inkluderar alla sjöar i sjöregistret ner till 1 ha och även kalkade sjöar som är försurade var andelen försurade sjöar i Sverige 2010 10 %. Skillnaden mellan mb2010 och mb2012 gäller främst de okalkade sjöarna. För de kalkade sjöarna var andelen försurade sjöar ca 60 % oavsett biblioteksversion.

Tabell 5. Andel försurade sjöar i hela Sverige år 2010. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

	Sjöar > 4 ha		Sjöar > 1 ha	
	mb2010	mb2012	mb2010	mb2012
Opåverkade	83,5	84,7	84,8	86,7
Kalkade ej försurade	4,3	4,3	3,1	3,3
Kalkade försurade	6,8	6,8	5,1	4,9
Ej kalkade försurade	5,4	4,2	7	5,0

Regional fördelning

Län

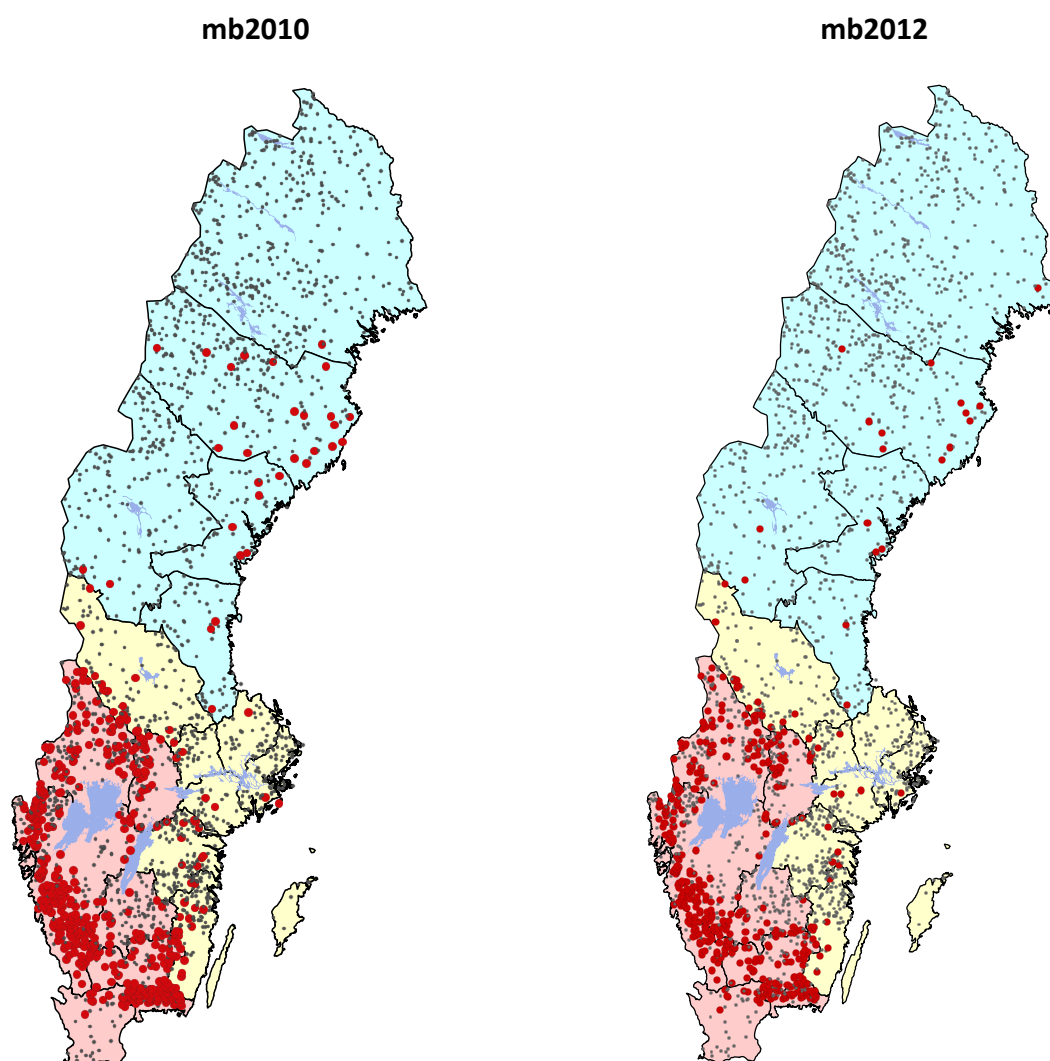
De försurade sjöarna är främst koncentrerade till ”försurningsbananen” Blekinge, Halland, Bohuslän, Dalsland och Örebro län (figur 3). Med mb2012 blir den bilden något tydligare med färre försurade sjöar i sydöstra Sverige och i Norrland. I Östergötland (E) minskar

andelen sjöar som bedöms som försurade från 11 % till 5 % med det nya biblioteket och i Kalmar län (H) minskar andelen från 21 % till 10 % (tabell 6).

Av de 89 sjöarna i Kalmar län som ingick i Omdreven 2007 – 2009 bytte 10 sjöar klassning från påverkat till opåverkat av försurning ("PO"-sjöar), och en bytte åt motsatta hållet. 8 sjöar var påverkade enligt båda biblioteken. Av de 11 sjöarna som bytte klassning var 6 kalkade. Sju av sjöarna hade pH > 6 (för de kalkade efter korrigering för kalkning).

I Västernorrland minskar andelen försurade sjöar från 11 till 4 procent. Det beror på att 3 av de 6 sjöarna som klassades som försurade i mb2010 bytte klassning till opåverkade och ingen bytte åt det andra hållet. Skillnaden förstärktes av att "PO"-sjöarna i Y-län hade höga viktningsskattor. I Västerbotten minskade andelen försurade sjöar från 10 % till 6 %.

I Värmland ökade andelen försurade sjöar från 32 till 36 % och i Västmanlands län (U) ökade andelen försurade sjöar från 6 % till 10 %.



Figur 3. Omdrevsinventeringen 2007-2009. Röda stora punkter anger försurade sjöar enligt MAGIC_{bibliotek} där kalkningspåverkade sjöar bedömts utifrån beräknad okalkad kemi. Kartan visar länsindelning och färgerna visar regionsindelning. Jämförelserna mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Tabell 6. Andel försurade sjöar fördelat på län samt regioner enligt den fördjupade utvärderingen från 2007 (FU2007) samt indelningen i denna rapport. Bedömningar med MAGIC_{bibliotek} av resultat från Omdrevsinventeringen 2007-2009. Kalkningspåverkade sjöar har bedömts utifrån beräknad okalkad kemi. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Län	Antal sjöar i underlaget	Region enligt FU2007	Ny regionsindelning	Andel försurade sjöar % viktat	
				mb2010	mb2012
AB	71	ÖM	ÖM	3	2
C	36	ÖM	ÖM	3	0,0
D	33	ÖM	ÖM	9	13
E	136	ÖM	ÖM	11	5
F	118	SV	SV	25	26
G	95	SV	SV	60	56
H	89	ÖM	ÖM	21	10
I	6	ÖM	ÖM	0	0,0
K	62	ÖM	SV	79	60
M	47	SV	SV	46	36
N	61	SV	SV	83	78
O	287	SV	SV	58	50
S	175	SV	SV	32	36
T	82	ÖM	SV	36	33
U	53	ÖM	ÖM	6	10
W	128	ÖM	ÖM	9	9
X	61	N	N	6	3
Y	70	N	N	11	4
Z	169	N	N	1	2
AC	243	N	N	10	6
BD	388	N	N	0,4	0,4
Hela Sverige	2410			12	10

Landsdelar

Trots en viss förändring i det regionala mönstret kvarstår förslaget med uppdelningen i tre landsdelar från Fölster och Köhler, (2011) som innebär att Blekinge (K) och Örebro län (T) flyttas från den Östra-mellersta regionen till den sydvästra jämfört med indelningen i Fördjupade utvärderingen 2007 (Naturvårdsverket 2007). Andelen försurade sjöar blir mindre för alla tre regioner med mb2012 jämfört med mb2010 (tabell 7).

Tabell 7. Andel försurade sjöar fördelat på tre regioner. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

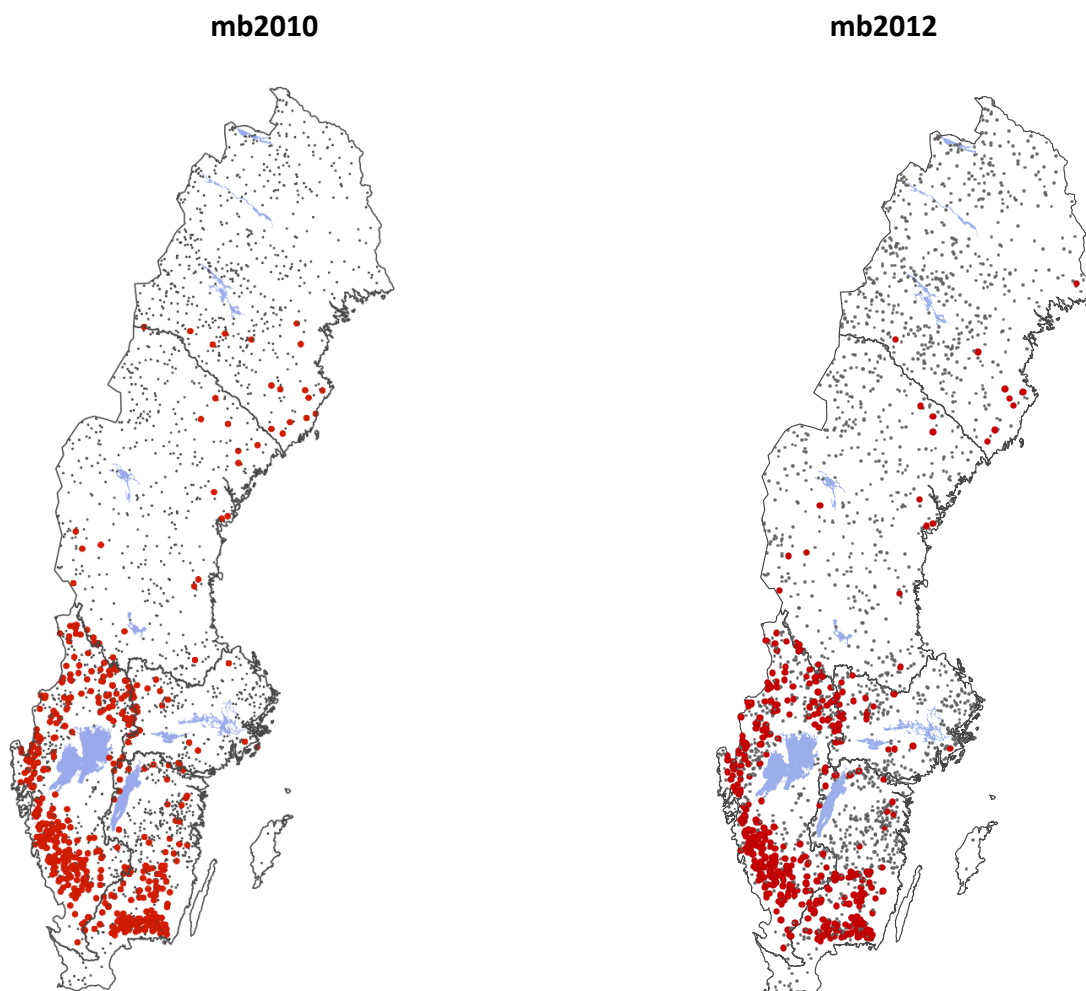
Landsdel 11	Andel försurade sjöar (%)	
	mb2010	mb2012
N	4,2	2,6
ÖM	9,5	7,9
SV	50,3	45,9

Vattendistrikt

Andelen försurade sjöar blir mindre i samtliga vattendistrikt med mb2012 jämfört md mb2010 med undantag för norra Östersjön, där det sker en obetydlig ökning (figur 4). Störst förändring var i Södra Östersjöns vattendistrikt med 27 % istället för 34 % (tabell 8).

Tabell 8. Andel försurade sjöar fördelat på vattendistrikt. Bedömningar med MAGIC_{bibliotek} av resultat från Omdrevsinventeringen 2007-2009. Kalkningspåverkade sjöar har bedömts utifrån beräknad okalkad kemi. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Vattendistrikt	Antal sjöar i underlaget	Andel försurade sjöar	
		mb2010	mb2012
Bottenviken	572	4	2
Bottenhavet	450	6	4
Norra Östersjön	248	8	9
Södra Östersjön	489	34	27
Västerhavet	651	51	48



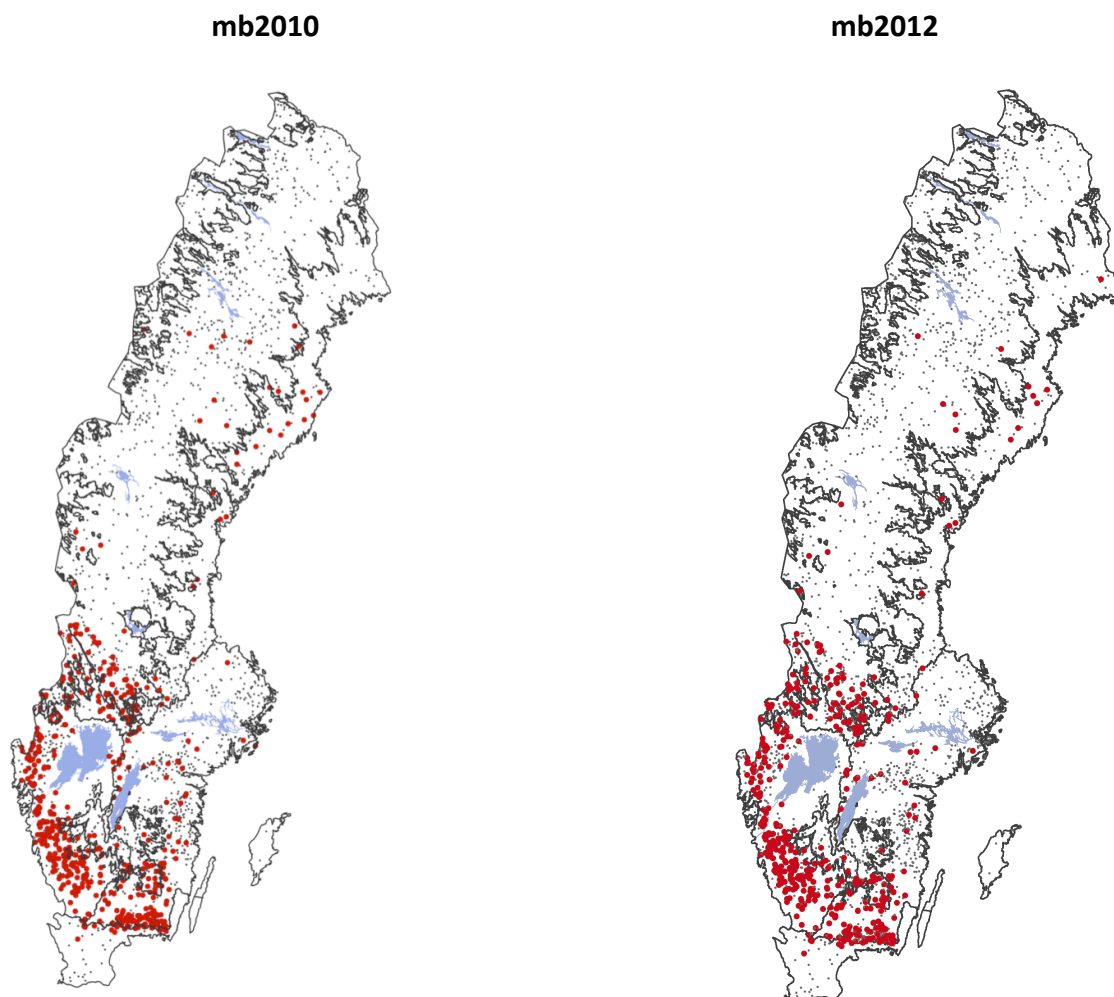
Figur 4. Omdrevsinventeringen 2007-2009. Röda stora punkter anger försurade sjöar enligt MAGIC_{bibliotek} där kalkningspåverkade sjöar bedömts utifrån beräknad okalkad kemi och de små svarta punkterna visar opåverkade sjöar. Kartorna visar indelning i vattendistrikt. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Sjölimniska regioner

Andelen försurade sjöar blir lägre med mb2012 jämfört med mb2010 i alla sjölimniska regioner (tabell 9 och figur 5).

Tabell 9. Andel försurade sjöar fördelat på limniska regioner enligt Vattenförvaltningsförordningen. Bedömningar med MAGIC_{bibliotek} av resultat från Omdrevsinventeringen 2007-2009. Kalkningspåverkade sjöar har bedömts utifrån beräknad okalkad kemi. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Limnisk region	Antal sjöar i underlaget	Andel försurade sjöar	
		mb2010	mb2012
Fjällen	163	1	0,3
Norrlands inland	857	5	4
Norrlands kust	271	16	13
Sydöst	556	25	18
Södra Sverige	47	52	41
Sydväst	385	61	54
Sydsvenska höglandet	131	29	28



Figur 5. Omdrevsinventeringen 2007-2009. Röda stora punkter anger försurade sjöar enligt MAGIC_{bibliotek} där kalkningspåverkade sjöar bedömts utifrån beräknad okalkad kemi och de små svarta punkterna visar opåverkade sjöar. Kartorna visar sjölimniska regioner enligt Vattenförvaltningsförordningen. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

Osäkerheten som beror av det slumpmässiga urvalet

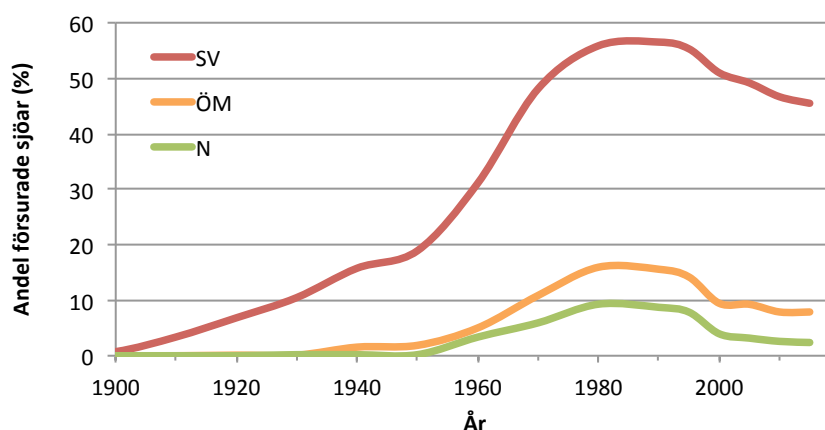
Uppskattningen av andel försurade sjöar bygger på ett slumpvis urval av sjöar i sjöregistret. Urvalet av 2 410 sjöar innebär ett visst fel jämfört med om man provtagit alla ca 100 000 sjöar. Osäkerheten i uppskattningarna beräknades med en form av så kallad Monte Carlo simulering. Den visar att andelen försurade sjöar i Sverige ligger mellan 9,0 och 11,2 %. Osäkerhetsintervallet för landsdelarna varierar från 2,3 procentenheter för Norrland och 6,8 procentenheter för sydvästra Sverige (tabell 10).

Tabell 10. Osäkerhetsintervall av andel försurade sjöar i Sverige uppdelat i tre landsdelar.

Region	Andel försurade sjöar Intervall	
N	1,5	3,8
ÖM	4,5	11,4
SV	42,7	49,2
Sverige	8,9	11,2

Förändring i andelen försurade sjöar med tiden

Den dynamiska modellen MAGIC gör det möjligt att rekonstruera hur andelen försurade sjöar i Sverige förändrats med tiden (figur 6). I sydvästra Sverige påbörjades försurningen redan för hundra år sedan. I övriga Sverige var det först efter 1950 som sjöförsurningen tog fart. På 1980-talet nådde försurningen sitt maximum med 56 % av sjöarna försurade i sydvästra Sverige, 16 % i östra och mellersta Sverige samt 9 % i norra Sverige (för indelningen, se kartan i figur 3). Återhämtningen var snabbast under 1990-talet och i dag är försurningen nere i 46 %, 7,9 % respektive 2,6 % i de tre respektive landsdelarna (se tabell 7). Återhämtningen är betydligt måttligare jämfört med den enligt beräkningarna med MAGIC_{bibliotek, 2007} som låg till grund för den Fördjupade utvärderingen 2007 (Naturvårdsverket, 2007).



Figur 6. Utvecklingen av andelen försurade sjöar i Sverige 1900-2020 uppdelat på tre regioner: Sydvästra Sverige (SV), Östra och mellersta Sverige (ÖM) och Norra Sverige (N).

Uppskattning av försurningspåverkan i vattendrag

En uppskattning av andelen försurad rinnsträcka gjordes baserat på resultaten från Omdrevssjöarna på samma sätt som i Fölster och Köhler (2011). mb2012 gav något mindre andel ej kalkad försurad rinnsträcka och något större andel opåverkad rinnsträcka jämfört med mb2010 (tabell 11). För de kalkade vattendragen låg förändringarna inom avrundningsmarginalen.

Tabell 11. Andel (i %) försurad och kalkad rinnsträcka i Sverige beräknat från sjöar. Jämförelse mellan två versioner av MAGIC_{bibliotek}, mb2010 och mb2012.

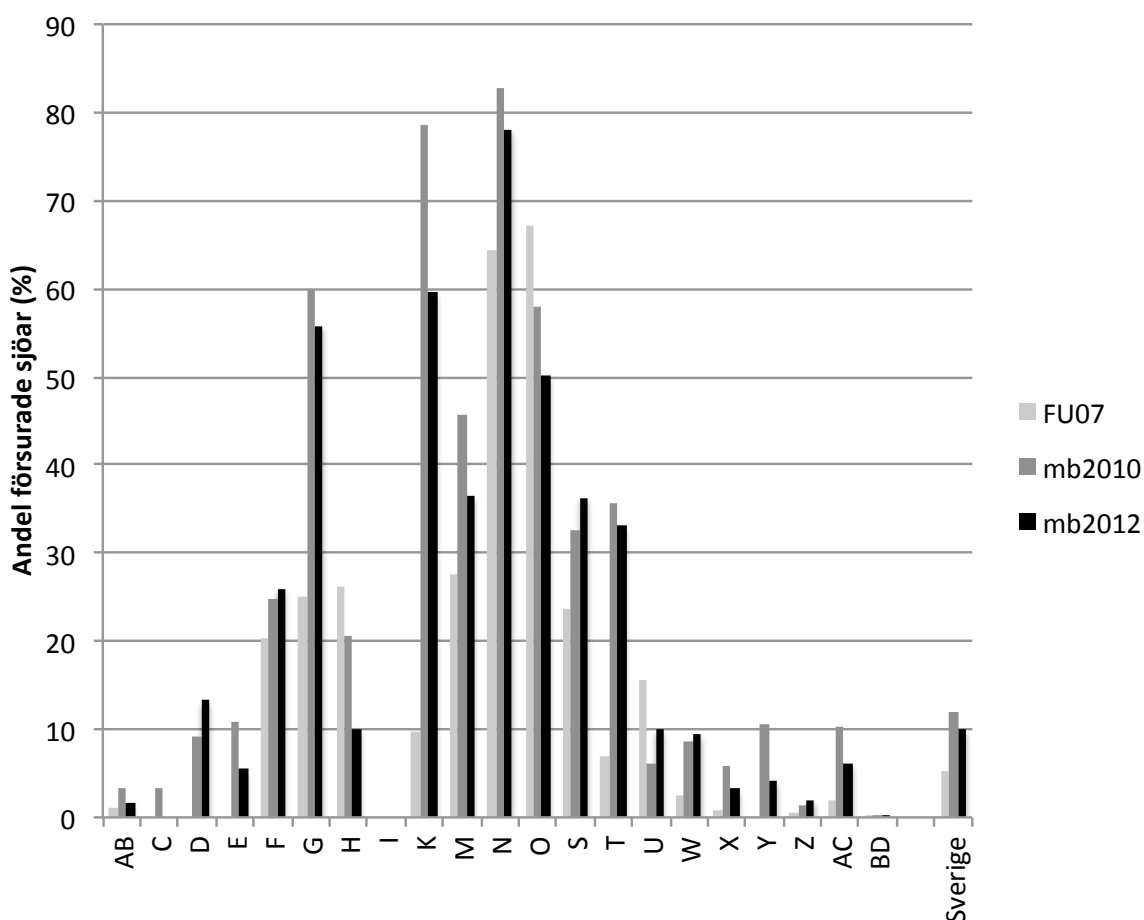
	> 2 km ²		Alla vattendrag	
	mb2010	mb2012	mb2010	mb2012
Opåverkade	80	81	78	80
Kalkade ej försurade	6	6	5	5
Kalkade försurade	10	10	7	7
Ej kalkade försurade	4	3	10	8



Bild: Östra Anråsälven.

Skillnad i bedömningen av försurningspåverkan jämfört med bedömningen till den fördjupade utvärderingen 2007.

I Rapport 2011:24, där mb2010 användes, noterades stora ökningar av andelen sjöar som klassades som försurade i G, K, M, N och T län jämfört med rapporteringen i Fördjupade utvärderingen 2007. Med mb2012 kvarstår dessa förändringar till stora delar, förutom att ökningen i K-län dämpades något (figur 7). I H, O och U län minskade i stället andelen försurade sjöar med Fölster och Köhler (2011) jämfört med FU. I H och U län minskade andelarna ytterligare med mb2012, medan andelen för U-län med mb2012 blev något högre. Den större andelen försurade sjöar i Norrland jämfört med den fördjupade utvärderingen 2007 kvarstår men dämpas betydligt.

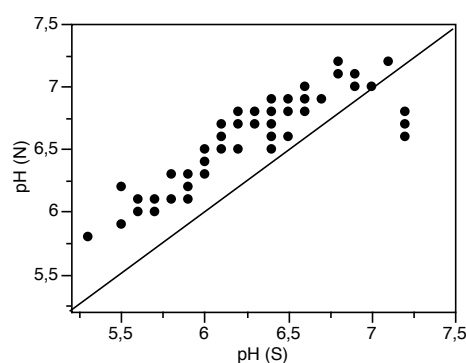


Figur 7. Länsvis jämförelse av andelen försurade sjöar mellan det underlag som ingick i den fördjupade utvärderingen 2007 (FU07) och två versioner av MAGICbibliotek med nyare sjödataunderlag. Andelarna avser sjöar > 1 ha och inkluderar försurade kalkade sjöar. FU07 baserade sig på Riksinventeringen 2005 och MAGICbibliotek från 2007. mb2010 och mb2012 baserar sig på omdrevsundersökningen 2007-2009 och MAGICbibliotek från 2010 respektive 2012. För mb2010 och mb2012 har korrigeringen för kalkningspåverkan förbättrats.

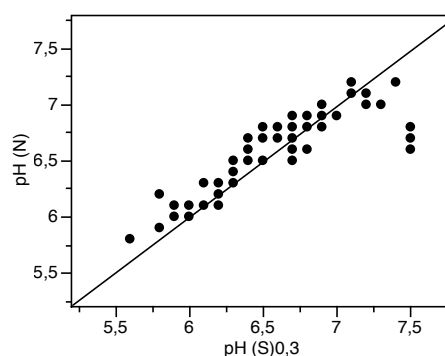
Jämförelse av referens-pH från paleolimnologi och MAGIC

I Fölster och Köhler (2011) gjordes en jämförelse av referensvärden för pH från MAGIC från 2010 (mb2010) och paleolimnologiska rekonstruktioner. Jämförelsen visade att MAGIC gav ca. 0,2 pH-enheter högre referens-pH jämfört med den paleolimnologiska rekonstruktionen. Nedan följer en motsvarande jämförelse mot paleolimnologi för modelleringarna med MAGIC från 2012 (mb2012).

Paleolimnologiska rekonstruktioner av pH (paleo-pH) ger kunskap om den historiska förändringen som den avspeglas i sjöns sediment. Artsammansättningen av kiselalger fungerar som ett historiskt arkiv (Guhrén m. fl., 2003) och kan agera som en oberoende kontroll av MAGIC- modellerade beräkningar av förindustriellt pH. Erlandsson m. fl. (2008) jämförde MAGIC med paleo-pH och fick då fram att de två beräkningarna av förindustriellt pH i regel gav samma resultat när man tog hänsyn till kolsyratrycket (pCO_2). Modellerna för pH-beräkning ur kiselalgsammansättning bygger på ett dataset med 118 sjöar från Norra Sverige (NORR) (Korsman och Birks, 1996) och SWAP som bygger på 178 sjöar från Svenska västkusten (Stevenson m. fl., 1991). Det slumpmässiga felet i modellerna brukar anges till $\pm 0,3$ enheter. Tillförlitligheten i paleorekonstruktionerna bygger på den analoga styrkan dvs. överensstämmelsen av kiselalger i sedimenten mellan sjön och referenssjöarna. I denna jämförelse användes i första hand datasetet med högst analog styrka. Om båda dataseten gav samma analoga styrka så användes NORR. Fölster och Köhler (2011) jämförde de två kalibreringsmetoderna och kom fram till att SWAP systematiskt gav 0,35 pH för lågt referens-pH, vilket är i samma storleksordning som i en studie av Battarbee m. fl. (2008) som indikerade ett systematiskt fel på 0,31 pH-enheter. Detta har tagits med i beräkningarna genom att 0,3 pH-enheter lades till pH-värdena från SWAP-datasetet för att minimera den systematiska skillnaden mellan pH SWAP och pH NORR (figur 8a & figur 8b).



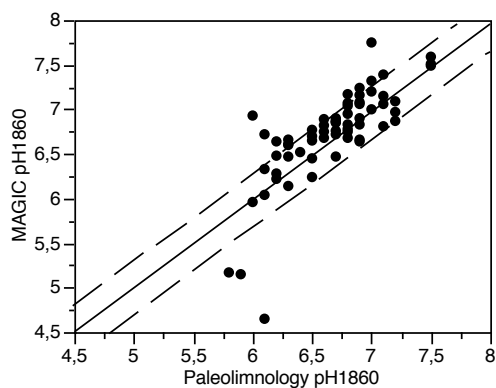
Figur 8a. pH NORR beräknat mot pH SWAP. Man ser tydligt systematiskt fel dvs pH SWAP visar lägre referens pH. I denna graf så har inte styrkan på analogerna tagits i beaktning. 1/1 linjen visas i grafen.



Figur 8b. pH NORR beräknat mot pH SWAP + 0,3 pH enheter. I denna graf så finns inget systematiskt fel mellan pH SWAP +0,3 och pH NORR. Styrkan på analogen har ej tagits i beaktning i denna graf. 1/1 linjen visas i denna graf.

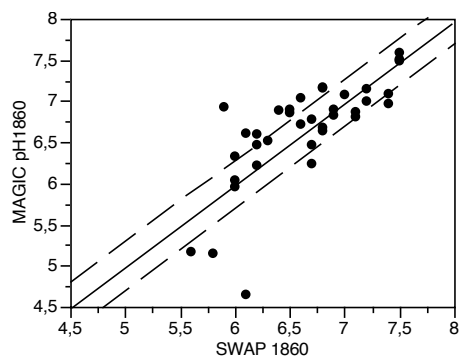
För att beräkna referens-pH i mb2012 så har samma metod använts som i Erlandsson m.fl. (2008) dvs. pH beräknat ur ANC_{1860} och detta har i sin tur jämförts med paleorekonstruktioner. I denna jämförelse användes bara sjöar som visade hög analog styrka. SWAP kompensades med +0,3 pH enheter även här. Totalt finns det 83 sjöar där både paleo- och MAGIC-pH finns representerade. Utav dessa sjöar har 66 stycken en stark analog med pH NORR eller pH SWAP. Om båda sjöarna visade en stark analog så användes beräkningen med NORR datasetet. 62 sjöar i analysen har beräknats med NORR och fyra

med SWAP. Resultatet visar ett starkt samband mellan MAGIC₂₀₁₂ pH₁₈₆₀ och paleo-pH₁₈₆₀ med ett R^2 på 0,6 och de flesta sjöar är innanför fel-intervallet på $\pm 0,3$ pH-enheter. 12 av 61 sjöar föll utanför felintervallet (figur 9). Medelskillnaden mellan MAGIC pH₁₈₆₀ och paleo-pH₁₈₆₀ är 0,07 pH-enheter, dvs. att mb2012 visar högre referensvärde än paleolimnologi.

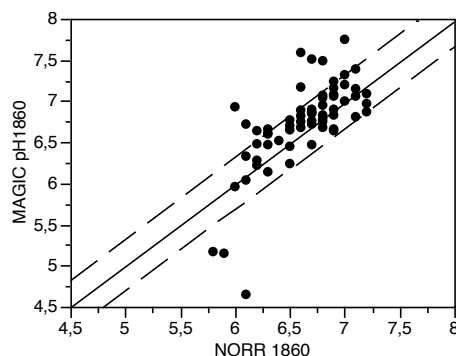


Figur 9. Figuren visar referens-pH mellan MAGIC pH₁₈₆₀ mot paleolimnologi pH₁₈₆₀. De paleolimnologiska (x-axeln) data är endast sjöar som har den starkaste analogen av antagligen SWAP eller NORR. Figuren visar 1/1 linjen samt felintervall på 0,3 pH-enheter för paleolimnologi.

Om man analyserar paleo-modellerna separat så ser man en viss skillnad gentemot föregående analys, i denna analys så har endast den starkaste analogen används för både SWAP och NORR. SWAP har 37 sjöar med en stark analog medan antalet för NORR är 68. SWAP mot MAGIC visar en medeldifferens på 0,1 pH enheter där MAGIC visar högre referens-pH än SWAP. Figuren visar på ett R^2 -värde på 0,56 (Figur 10a). MAGIC pH 1860 mot NORR visar mindre spridning runt 1/1 linjen i jämförelse med SWAP dataset men liknande R^2 värde på 0,50. Medeldifferensen mellan mb2012 och NORR var 0,12 (Figur 10b).



Figur 10a. MAGIC pH₁₈₆₀ mot Paleo-SWAP 1860. Endast sjöar med stark analog visas i denna plot. 1/1 linjen samt fel intervall på 0,3 pH enheter för paleolimnologi visas i plotten.



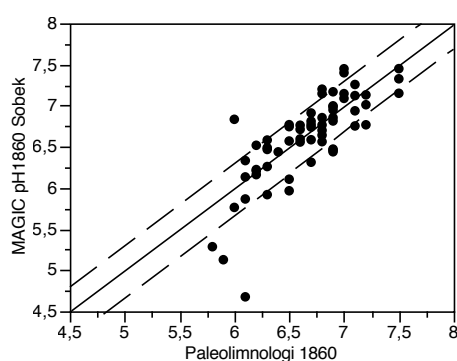
Figur 10b. MAGIC pH₁₈₆₀ mot Paleo-NORR 1860. Endast sjöar med stark analog visas i denna plot. 1/1 linjen samt fel intervall på 0,3 pH enheter för paleolimnologi visas i plotten.

Erlandsson m. fl. (2008) visade att kolsyratrycket ($p\text{CO}_2$) har stor betydelse vid beräkningar av referens-pH. I denna rapport så har även kolsyratryckets betydelse för jämförelsen mellan mb2012 och paleo-rekonstruktioner av pH undersökts. Tre olika värden på $p\text{CO}_2$ har använts: $4\times$ partialtrycket i atmosfären, vilket är det $p\text{CO}_2$ som används i mb2012. Det andra värdet

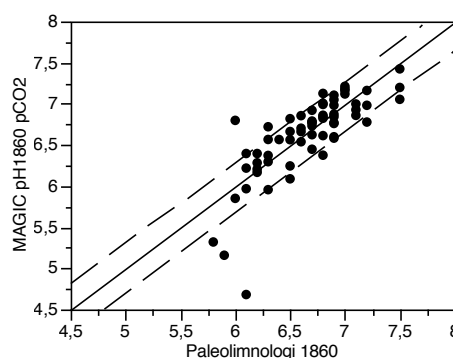
beräknades med Sobeks formel (Sobek m. fl., 2003), och det tredje värdet bygger på dagens vattenkemi och en triprotisk modell för organiska syror (Köhler m. fl., 2000).

Beräkning av förindustriellt pH med hjälp av ANC_{MAGIC} och Sobeks formel för pCO_2 ger ett relativt starkt samband med paleolimnologi. 16 av 66 sjöar hamnar utanför felintervallet $\pm 0,3$ pH-enheter. Jämförelsen visar ett R^2 värde 0,62 samt en medeldifferens på 0,05 pH-enheter (Fig. 11a).

Beräknat pCO_2 utifrån vattenkemi, sjömedelvärden 2000-2011, med en triprotisk modell för organiska syror visar ingen större skillnad gentemot Sobeks formel. Dock kan vi urskilja en mindre spridning runt 1/1 linjen samt se att 13 av 66 sjöar är utanför felintervallet $\pm 0,3$ pH-enheter. Denna beräkning visade ett R^2 värde på 0,60 samt en medeldifferent mot paleo-pH på 0,04 pH-enheter (Fig. 11b).



11a. MAGIC-pH beräknat med Sobeks formel för pCO_2 plottat mot paleolimnologiskt pH. De inritade linjerna är 1/1-linjen samt felintervallet kring denna på 0,3 pH-enheter.



11b. MAGIC-pH beräknat med pCO_2 från nutida vattenkemi plottat emot paleolimnologiskt pH. De inritade linjerna är 1/1 linjen samt felintervallet kring denna på 0,3-pH enheter.

Den tredje beräkningsmetoden är att använda ett schablonvärde på 4 ggr atmosfäriskt tryck och det är den metoden som har använts för beräkningarna i mb2012 (figur 9). Jämförelsen mellan ett beräknat pCO_2 och schablonvärdet för MAGIC har en medeldifferens på 24 %.

Sammanfattningsvis från resultaten av mb2012 och paleolimnologi så finner vi:

- MAGIC ger en bra överensstämmelse med de paleolimnologiska rekonstruktionerna av pH (mb2012).
- De flesta av de undersökta sjöarna faller inom felintervallet av $\pm 0,3$ pH-enheter.
- MAGIC visar fortfarande högre referens-pH i jämförelse med paleolimnologi, men skillnaden är betydligt mindre (mb2012).
- Medeldifferensen mellan pH från mb2012 och paleo-pH är 0,09 pH-enheter vilket är en tydlig minskning i jämförelse med mb2010 (Fölster och Köhler, 2011).
- Om man korregerar för att mb2012 överskattar försurningen med 0,1 pH-enheter blir andelen försurade sjöar i Sverige 8 % istället för 10%.

En viktig sak att poängtera är att dessa MAGIC-simuleringar är kalibrerade på långa tidsserier utav uppmätta vattenkemiska data från 1980 talet. De flesta MAGIC-modellerade sjöarna saknar tidsserier av vattenkemi och är kalibrerade utifrån något eller några enstaka

vattenkemiprover. Det är inte säkert att överensstämmelsen mellan MAGIC och paleolimnologi skulle vara lika bra för alla sjöar i MAGIC_{bibliotek}.

Kritisk belastning

Dataunderlaget

Denna beräkning av den kritiska belastningen är gjord utifrån depositionsdata från EMEP till skillnad från Fölster och Köhler (2011) då data från MATCH användes. Beräkningarna är gjorda med en modifierad version av FAB-modellen (CCE, 2008) där en del av indata hämtats från resultaten av MAGIC_{bibliotek, 2012}. Cecilia Akselsson på Lunds universitet har bidragit med data för skogsupptag av kväve och baskatjoner baserat på den nationella miljöövervakningen av skog.

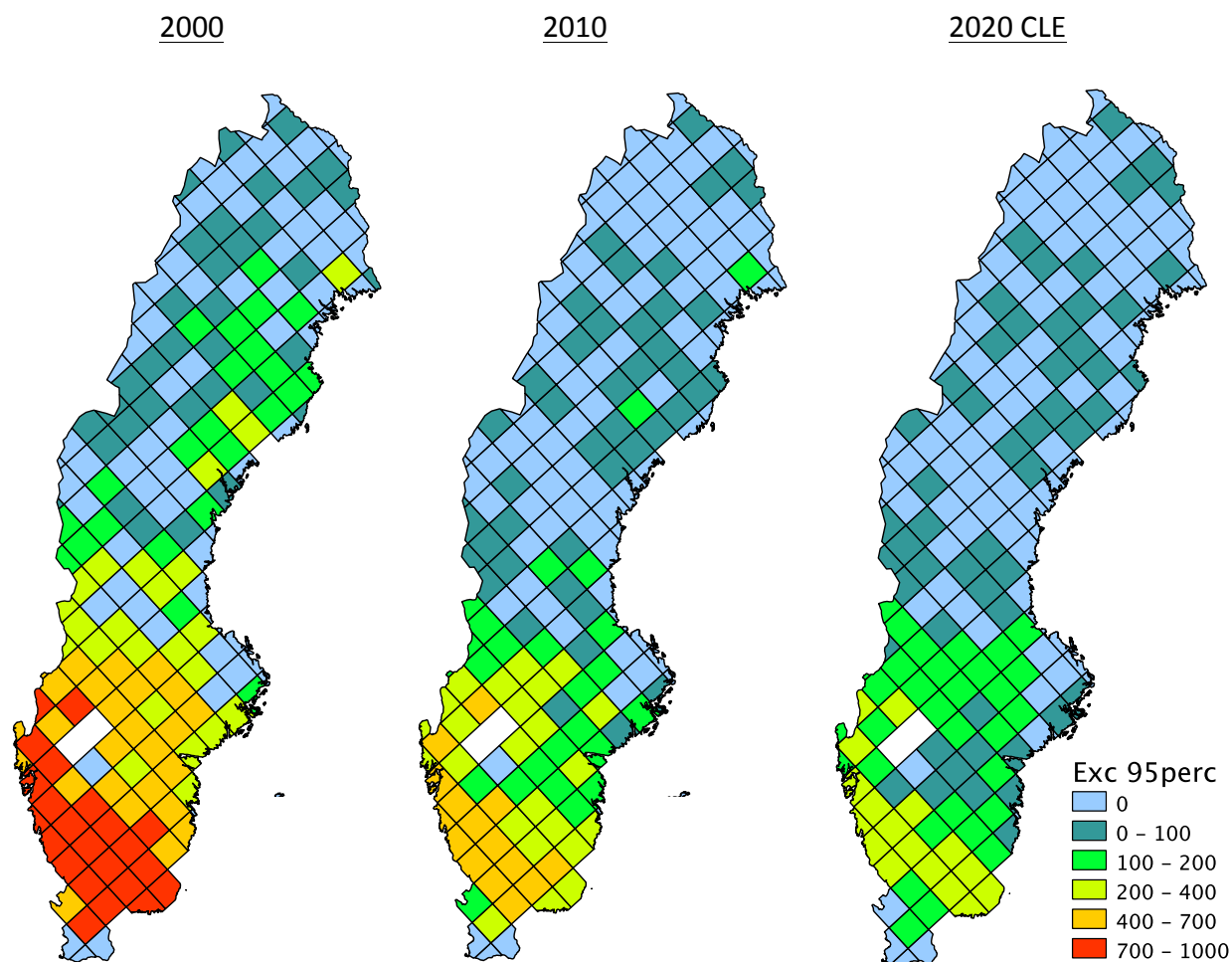
Resultat

Den kritiska belastningen överskreds på 22 % av Sveriges areal år 2010 enligt det nya dataunderlaget (tabell 12). Detta är betydligt högre än de beräkningarna i Rapport 2011:24 som gav 16,1 % överskridande. Överskridandet var högst i sydvästra Sverige (figur 12). Fram till år 2020 beräknas den överskridna arealen ha minskat till 19 % om man genomför beslutade åtgärder (CLE-scenariet). Det är drygt hälften av arealen av överskridandet 2000, men det är fortfarande långt kvar till att depositionen inte överskrider den kritiska belastningen någonstans. Om man genomför alla rimliga tekniska åtgärder (MFR-scenariet) minskar överskridandet till 16 % av arealen.

Räknar man på ännu lägre depositioner för att finna ett gränsvärde där den kritiska belastningen inte överskrider visar sig en brist i beräkningsmetodiken som gör att den överskridna arealen inte sjunker under 0 förrän man satt depositionen till 0. Vill man beräkna hur mycket depositionen måste minska för att uppnå miljömålet måste beräkningstekniken utvecklas.

Tabell 12. Överskriden area av kritisk belastning enligt Omdrevsundersökningen 2007-2009. Beräkningarna omfattar sjöar > 1 ha och baseras på data från MAGIC_{bibliotek, 2012} och deposition från EMEP.

År	Överskriden area %
2000	34
2010	22
2020 CLE	19
2020MFR	16



Figur 12. Överskridande av kritisk belastning för försurning av sjöar baserat på omdrevsinventeringen 2007-2009. Klassningen avser 95-percentilen av överskridandet, d.v.s. överskridandet för de 5 % känsligaste sjöarna i varje ruta.

Referenser

- Battarbee, R. W., Monteith, D. T., Juggins, S., Simpson, G. L., Shilland, E. W., Flower, R. J. and Kreiser, A. M. (2008). "Assessing the accuracy of diatom-based transfer functions in defining reference pH conditions for acidified lakes in the United Kingdom." *Holocene* **18**(1): 57-67.
- CCE (2008). CCE Status report 2008 Critical load, dynamic modelling and impact assessment in Europe.
- Erlandsson, M., Bishop, K., Fölster, J., Guhren, M., Korsman, T., Kronnas, V. and Moldan, F. (2008). "A comparison of MAGIC and paleolimnological predictions of preindustrial pH for 55 Swedish lakes." *Environmental Science & Technology* **42**(1): 43-48.
- Erlandsson, M., Fölster, J., Laudon, H., Weyhenmeyer, G. A. and Bishop, K. (2008). "Natural variability in lake pH on seasonal, interannual and decadal time scales: Implications for assessment of human impact." *Environmental Science & Technology* **42**(15): 5594-5599.
- Fölster, J. (2007). "Förslag till Bedömningsgrunder för försurning i sjöar och vattendrag. Inst. för Miljöanalys, SLU. Rapport 2007:9." 28.
- Fölster, J. and Köhler, S. (2011). Försurningsläget i Sveriges ytvatten 2010
- Trender i vattenkemi samt bedömning av försurning och överskridande av kritisk belastning av försurande ämnen för ytvatten i Sverige. Underlag till utvärdering av miljömålet "Bara naturlig försurning. Rapport 2011:24, Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Fölster, J., Moldan, F. and Stadmark, J. (2011). Målsjöundersökningen 2007–2008. Naturvårdsverket. Rapport 6412.
- Guhren, M., Rosén, P., Korsman, T. and Renberg, I. (2003). Tidigare pH i Referenssjöar i Sverige. Inst. för Ekologi och Miljövård, Umeå Univeristet.
- Korsman, T. and Birks, H. J. B. (1996). "Diatom-based water chemistry reconstructions from northern Sweden: A comparison of reconstruction techniques." *Journal of Paleolimnology* **15**(1): 65-77.
- Köhler, S. (2011). Analys och systematiskt utvärdering av avvikelser mellan uppmätta och modellerade halter av oorganiskt aluminium i tidsseriesdata i sjöar, Institutionen för vatten och miljö, SLU. **2011:25**.
- Köhler, S. and Fölster, J. (2011). Granskning och dokumentation av bedömningsgrunder för försurning - MAGIC-modellering. Rapport 2011:23, Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Köhler, S., Laudon, H., Wilander, A. and Bishop, K. (2000). "Estimating organic acid dissociation in natural surface waters using total alkalinity and TOC." *Water Research* **34**(5): 1425-1434.
- Naturvårdsverket (1985). *Monitor 1985 PMK: på vakt i naturen*.
- Naturvårdsverket (2007). "Bara naturlig försurning. Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet. Rapport 5766."
- Sobek, S., Algesten, G., Bergstrom, A. K., Jansson, M. and Tranvik, L. J. (2003). "The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes." *Global Change Biology* **9**(4): 630-641.
- Stevenson, A. C., Juggins, S., Birks, H. J. B., Anderson, D. S., Anderson, N. J., Battarbee, R. W., Berge, F., Davis, R. B., Flower, R. J., Haworth, E. Y., Jones, V. J., Kingston, J. C., Kreiser, A. M., Line, J. M., Munro, M. A. R. and Renberg, I. (1991). The Surface Waters Acidification Project Palaeolimnology Programme: Modern Diatom/Lake-Water Chemistry Data-Set, ENSIS: London.

